

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Алехина Юлия Александровна**

**Магнитная томография аморфных магнитных микропроводов**

Специальность 1.3.12 – Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре магнетизма Физического факультета  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель** – **Перов Николай Сергеевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты** – **Юрасов Алексей Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры  
нанoeлектроники Института перспективных  
технологий и индустриального  
программирования РТУ МИРЭА

**Бузников Никита Александрович**  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ООО Газпром  
ВНИИГАЗ

**Розанов Константин Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, директор  
ИТПЭ РАН

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 15 часов 20 минут  
на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского  
государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г.  
Москва, Ленинские горы, д. 1 стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной  
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на  
сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/500535144/>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие новых цифровых технологий и роботизированных систем является одним из важнейших наукоемких направлений модернизации техники и экономики. Поиск новых материалов, обеспечивающих эффективную работу устройств, играет в этом процессе одну из ключевых ролей, иногда определяя не только количественные характеристики эффективности, но и направление развития промышленности и наук о материалах. Зачастую вызванная перспективой практического приложения определенного типа материалов исследовательская активность инициирует фундаментальный интерес и позволяет получить принципиально новые знания о физических процессах и явлениях, а также рассмотреть новые модельные объекты.

Ярким примером зарождения такого рода интереса являются аморфные ферромагнитные сплавы. Несмотря на известную еще с 40-х годов прошлого столетия возможность существования металлов в аморфном состоянии, используемую на практике для создания эталонных сопротивлений, теоретическое предсказание [1] и экспериментальное подтверждение [2] возможности ферромагнитного упорядочения в аморфной структуре спровоцировали лавинообразное увеличение количества исследований и публикуемых работ как в теоретическом, так и в экспериментальном направлениях.

Несмотря на активные исследования в течение нескольких десятилетий, аморфные ферромагнитные сплавы до сих пор являются важным объектом изучения для научных групп по всему миру, многообещающим материалом для создания эффективных электротехнических устройств и перспективным элементом разработок усовершенствованных датчиков различных типов [3]. Их выраженные магнитномягкие свойства [4,5], а также ряд наблюдаемых в них эффектов, таких, как гигантский скачок Баркгаузена [6] или эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ) – изменения импеданса провода в магнитном поле, достигающего сотен процентов [7], - обуславливают огромный практический интерес к этому типу материалов в области электротехники и детектирующих устройств [3,8,9].

Область сенсорики и детектирования сигналов занимает особое положение в современных исследованиях, в том числе благодаря контексту развития «умных» устройств и систем. Особое место в ряду магнитных сенсоров занимают датчики на

основе ГМИ в аморфных материалах, обладающие высокой чувствительностью ( $\sim \text{пТл/Гц}^{1/2}$ ), низким уровнем шумов ( $\sim \text{фТл/Гц}^{1/2}$ ), малыми размерами (от 3 мкм) [3]. Кроме того, датчики, использующие аморфные магнитные микропровода в стеклянной оболочке в качестве чувствительного элемента, могут применяться в биологических приложениях [9]. В настоящий момент датчики на основе ГМИ являются одними из наиболее чувствительных магнитных сенсоров, работающих при комнатной температуре [3,10]. Данный факт подтверждает огромные перспективы их использования для магнитной энцефалографии, измеряющей активность отделов головного мозга по создаваемому магнитному полю. К настоящему моменту уже разработан магнитный энцефалограф, использующий СКВИД-датчики в качестве рабочих элементов [11]. Тем не менее, необходимость поддержания криогенных температур для работы детектора приводит к неизбежной экранировке сигнала нейронов и, следовательно, снижению точности энцефалограммы. Внедрение магнитоимпедансных датчиков может позволить преодолеть данные ограничения.

Магнитномягкие свойства аморфных магнитных микропроводов также делают их крайне перспективными материалами для использования в качестве чувствительных элементов систем удаленного детектирования, таких как RFID-детекторы и противокражные системы [12].

Особенности производства аморфных материалов методами быстрой закалки из расплава приводят к формированию сильной магнитоупругой анизотропии и нетривиального объемного распределения намагниченности [13]. В общем виде микромагнитная структура аморфных магнитных микропроводов описывается моделью «кern-оболочка» (нем. «kern» - ядро, сердечник), направления преимущественной ориентации намагниченности в рамках которой определяются распределением упругих напряжений и знаком константы магнитострикции сплава. Так, для микропроводов с положительной магнитострикцией характерно существование аксиально намагниченного керна и преимущественно радиальное направление намагниченности в оболочке. Для микропроводов с отрицательной константой магнитострикции намагниченность в приповерхностной области, как правило, имеет циркулярное направление, а в центральной части – аксиальное или радиальное в зависимости от распределения упругих напряжений в объеме [14,15].

Отклик аморфных микропроводов на магнитное поле в большой степени зависит от микромагнитной структуры материалов, определяющей механизмы процесса перемагничивания. Величина эффекта ГМИ, вид его полевой и частотной зависимости определяются преобладающим типом магнитоупругой анизотропии и величиной магнитной проницаемости в приповерхностной области [16]. Вид полевой зависимости намагниченности также несет информацию о преобладающих типах анизотропии в объеме провода. Так, наблюдение гигантского скачка Баркгаузена свидетельствует о наличии аксиально намагниченного керна, направление намагниченности которого переключается быстрым распространением доменной границы вдоль провода [6]. При этом внешние воздействия могут внести значительный вклад в формирование микромагнитной структуры проводов и, как следствие, их магнитных свойств. Различные методы обработки материалов – отжиг в печи или за счет Джоулева тепла при пропускании тока, приложение механических растягивающих или скручивающих нагрузок, травление, а также комплексное воздействие нескольких факторов – значительно модифицируют свойства аморфных микропроводов [15,17–19]. Так, например, скручивающие механические напряжения приводят к формированию геликоидальной анизотропии в приповерхностной области [20]. Было показано [21], что для проводов с такими свойствами характерна асимметричная полевая зависимость эффекта гигантского магнитного импеданса при приложении поля или пропускании тока смещения, что позволяет дополнительно повысить чувствительность детектирующих систем на их основе. Исследования систем микропроводов показали, что функции полей смещения могут выполнять магнитостатические взаимодействия соседних элементов системы [22].

Таким образом, оптимизация свойств аморфных микропроводов и систем на их основе для практических применений во многом связана с поиском материалов с наилучшей для конкретного приложения микромагнитной структурой и параметрами анизотропии. Кроме того, аморфные магнитные микропровода являются показательным модельным объектом физики микромагнитных структур. Сведения об объемном распределении намагниченности и механизмах его формирования, а также о механизмах и особенностях перемагничивания в одиночных проводах и в системах на

их основе представляют фундаментальный научный интерес и являются предметом исследований научных групп по всему миру.

Прямое же наблюдение микромагнитной структуры и ее динамики методами рентгеновской, нейтронной или электронной томографии в объектах такого масштаба на данный момент не представляется возможным [23]. Анализ магнитной структуры проводов проводится по данным об интегральных объемных или локальных поверхностных свойствах образца, не всегда позволяющим сделать однозначные выводы об их микромагнитной структуре. По этой причине, несмотря на достаточно глубокую **разработанность темы** аморфных магнитных микропроводов в области физики магнитных явлений, а также большое количество работ, посвященных исследованиям их свойств, и существования множества различных методик исследования магнитной структуры, задача восстановления распределения намагниченности и изучения ее эволюции под действием различных факторов остается **актуальной**. Большое значение в этом контексте приобретают согласованные косвенные измерения, позволяющие сделать выводы о магнитной структуре микропроводов из анализа комплекса экспериментальных данных, и симуляционные подходы, использующие экспериментальные результаты для расчетов.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы заключалась в исследовании особенностей магнитных свойств и микромагнитной структуры аморфных микропроводов и систем на их основе, а также в разработке методики магнитной томографии, а именно определения объемного распределения магнитной проницаемости в аморфных ферромагнитных микропроводах на основе данных о частотной зависимости импеданса проводов и интерпретации получаемых результатов с целью получения информации о микромагнитной структуре микропроводов с использованием микромагнитного моделирования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) экспериментальные исследования импеданса микропроводов различных составов, а также спиралей из аморфных микропроводов, определение их магнитостатических характеристик. анализ микромагнитной структуры микропроводов на основе данных об объемных магнитных характеристиках;

- 2) разработка численной модели частотной зависимости импеданса при пространственной неоднородности магнитной проницаемости, разработка методики определения радиального распределения циркулярной компоненты магнитной проницаемости по данным о частотной зависимости импеданса микропровода;
- 3) вычисление распределения магнитной проницаемости в сечении аморфных микропроводов по разработанной методике на основе полученных экспериментальных данных об импедансе микропроводов;
- 4) создание микромагнитной модели распределения намагниченности в аморфных микропроводах с положительной и отрицательной магнитострикцией, а также динамики полевого и токового перемагничивания; оценка объемного распределения магнитной проницаемости в модельном микропроводе; определение основных закономерностей радиальной зависимости проницаемости при наличии локальных особенностей магнитной структуры или механизма перемагничивания;
- 5) сопоставление результатов численных оценок распределения магнитной проницаемости из экспериментальных данных об импедансе с результатами микромагнитного моделирования; установление связей особенностей распределения магнитной проницаемости с микромагнитной структурой образцов.

### **Достоверность результатов**

Достоверность экспериментальных результатов, представленных в работе, определяется использованием современного научного оборудования и общепринятых статистических методов обработки данных и подтверждается воспроизводимостью при многократных измерениях, а также качественным совпадением основных закономерностей свойств с литературными данными. Обоснованность предлагаемой численной модели подтверждается использованием общеизвестных и широко используемых теоретических подходов к описанию рассматриваемых физических явлений с определенными границами применимости, а также совпадением полученных при моделировании результатов с известными экспериментальными данными.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Спирали на основе аморфных магнитных микропроводов могут обладать анизотропией отклика, которая зависит от параметров микропровода и катушки

спирали. В частности, наблюдается асимметричный магнитоимпедансный эффект, свойственный материалам с геликоидальной анизотропией при приложении поля или тока смещения; полем смещения в случае спиральных структур, вероятно, является магнитостатическое взаимодействие витков спирали.

2. Распределение магнитной проницаемости в сечении микропровода может быть определено на основе экспериментальных данных о частотной зависимости импеданса; при отсутствии неоднородных процессов перемагничивания, а также при малых вкладах полевой и частотной зависимости магнитной проницаемости в вариации импеданса, пространственная неоднородность магнитной проницаемости может выступать в качестве первого приближения зависимости импеданса цилиндрического ферромагнитного проводника от частоты.

3. Максимумы распределения магнитной проницаемости, получаемого на основе экспериментальных данных о частотной зависимости импеданса, а также распределения, получаемого с помощью микромагнитного моделирования токового перемагничивания микропровода, находятся в области предполагаемого положения доменной границы между аксиально намагниченным керном и оболочкой.

4. Достоверность результатов расчета магнитной проницаемости связана с однородностью процессов перемагничивания в микропроводе. Неоднородные процессы намагничивания могут приводить к возникновению вихревого поведения эффективного магнитного поля, что проявляется в виде осцилляций радиального распределения эффективной проницаемости и ее отрицательных значений.

5. Быстрое изменение магнитной проницаемости вдоль радиуса микропровода ограничивает точность расчетов и затрудняет возможность восстановления радиального распределения магнитной проницаемости с помощью разработанного алгоритма на основе данных о частотной зависимости импеданса провода.

6. Перераспределение механических напряжений при обработке аморфных ферромагнитных микропроводов приводит к изменению вида радиальной зависимости магнитной проницаемости, в том числе за счет изменения основного механизма перемагничивания.

## **Научная новизна**

В настоящий момент информация о микромагнитной структуре аморфных магнитных проводов в объеме не может быть получена с помощью прямых наблюдений. Данные о распределении намагниченности в объеме образцов получают косвенными методами на основе анализа объемных или поверхностных магнитных характеристик. В то же время вклад замыкающих доменов как на поверхности, так на концах микропровода, геометрии доменных границ в измеряемый магнитный отклик затрудняют интерпретацию получаемых данных.

В данной работе используется новый подход к анализу микромагнитной структуры аморфных микропроводов методом магнитной томографии на основе данных о частотной зависимости импеданса. Вариации толщины скин-слоя позволяют регулировать объем исследуемой области, и тем самым проследить за объемными вариациями магнитных свойств проводника. При этом в используемых для анализа импедансных свойствах подходах, магнитная проницаемость, как правило, считается постоянной величиной.

В работе впервые проводятся оценки локальных магнитных характеристик микропровода на основе микромагнитной модели, позволяющей определить закономерности поведения радиальной зависимости магнитной проницаемости, и их связь с микромагнитной структурой или механизмом перемагничивания. Данная информация представляет интерес для анализа процессов, происходящих в объеме аморфных материалов при перемагничивании.

Помимо аморфных микропроводов большой интерес представляют также структуры на их основе. Особенности микромагнитной структуры и взаимодействий между элементами структуры обеспечивают модифицированный отклик на магнитное поле, обеспечивающий новые перспективы практических приложений. В работе впервые рассматриваются магнитные и магнитоимпедансные свойства спиралей на основе аморфных микропроводов.

## **Практическая значимость**

Поскольку особенности микромагнитной структуры, такие, как локальные изменения направления осей и константы эффективной анизотропии, могут быть вызваны в том числе дефектами структуры или неоднородностями состава,

реализуемая по предлагаемому принципу магнитная томография может быть крайне перспективна в системах неразрушающего контроля материалов. Данный подход может применяться в том числе к элементам детекторов на основе эффекта ГМИ непосредственно в конструкции датчика в качестве аттестационной процедуры.

Подробные данные о микромагнитной структуре микропроводов различных типов могут значительно способствовать подбору необходимых материалов для оптимизации различных устройств.

### **Личный вклад автора**

Формулировка цели и постановка задач проведены диссертантом совместно с научным руководителем. Построение численных моделей и расчеты, а также микромагнитное моделирование были проведены автором работы самостоятельно. Экспериментальные данные о магнитостатических и импедансных характеристиках микропроводов  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  и спиралей на их основе были получены автором работы. Концептуализация модели и анализ полученных результатов проводились соавторами соответствующих работ совместно. Диссертант является основным автором публикаций по теме диссертации.

### **Апробация работы**

Основные результаты научно-квалификационной работы были представлены на 11 российских и международных конференциях и школах в виде стендовых и устных докладов: Soft Magnetic Materials (Гренобль, Франция, 2022), 5th Young Researchers in Magnetism (Жирона, Испания, 2021), International Baltic Conference on Magnetism (Светлогорск, Россия, 2021), Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-21 (Екатеринбург, Россия, 2021), Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах (онлайн, 2021), 63-я Всероссийская конференция МФТИ (онлайн, 2020), Joint European Symposia on Magnetism (онлайн, 2020), Joint European Symposia on Magnetism (Уппсала, Швеция, 2019), Euro-Asian Symposium on Magnetism (Екатеринбург, Россия, 2019), International Workshop on Magnetic Wires (Светлогорск, Россия, 2019), Collaborative Conference on Material Research (Сеул, Корея, 2019).

Результаты диссертационного исследования были получены в рамках выполнения грантов РФФИ 18-02-00137 «Исследование объемного распределения магнитной проницаемости в магнитномягких лентах и проводах» и 19-32-90089 «Микромагнитное моделирование процессов перемагничивания аморфных микропроводов переменным электрическим током», РФФИ 22-22-00606 «Влияние формы на процессы перемагничивания магнитномягких материалов».

## **Публикации**

По материалам диссертации **опубликовано 3** статьи в российских и зарубежных журналах, индексируемых по базам данных Web of Science и Scopus. В рамках апробации результатов опубликовано 12 тезисов докладов, представленных на 11 конференциях, на 3 из которых имеются ссылки в тексте диссертации.

## **Структура и объем**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов, заключения, списка литературы из 191 наименования и 3-х приложений. Общий объем работы составляет 116 страниц, включая 52 рисунка и 5 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и определены задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приводятся сведения об апробации результатов, личном вкладе автора и структуре диссертации.

В **первой главе** приводится обобщение литературных данных о микромагнитной структуре аморфных магнитных микропроводов. Кратко объяснена практическая значимость этого типа материалов и обоснован интерес в получении сведений о механизмах процессов перемагничивания и эволюции их магнитного отклика. Рассмотрены особенности формирования микромагнитной структуры микропроводов, описываются основные модели распределения намагниченности в микропроводах с различными знаками магнитострикции, а также свойственные им закономерности магнитных и магнитоимпедансных свойств. Описаны методы воздействия на микромагнитную структуру, такие, как приложение механической

нагрузки, отжиг при температурах ниже температуры кристаллизации сплава, а также их совместные применения, и вызываемые ими изменения магнитных характеристик. Проиллюстрированы влияния магнитостатических взаимодействий на свойства систем на основе микропроводов. Особое внимание уделяется методам наблюдения микромагнитной структуры в объеме микропроводов и сопряженным с ними сложностям исследований. Отмечается, что в настоящее время отсутствует возможность прямого наблюдения микромагнитной структуры методами рентгеновской, электронной или нейтронной томографии, а выводы о микромагнитной структуре преимущественно делаются на основе данных об интегральных объемных или локальных поверхностных свойствах материалов.

Во **второй главе** приводятся описания исследованных в диссертационной работе материалов, а также использованных методик измерений и подходов к анализу экспериментальных данных.

В работе рассмотрены две серии аморфных магнитных микропроводов, а также серия спиралей из аморфного микропровода. Первая серия образцов представляла собой набор микропроводов на основе кобальта ( $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ ) с диаметром металлической жилы 90 мкм, включающий образцы в стеклянной оболочке, без нее, а также 2 термически обработанных образца (отжиг в течение 1 часа при температуре 200°C и 300°C с последующим снятием стеклянной оболочки). Образцы спиралей были изготовлены из микропроводов идентичного состава. В работе рассмотрены две группы спиралей: первая группа включала в себя 3 образца спиралей на основе микропровода с диаметром металлической жилы 100 мкм, различающихся направлением намотки спирали и диаметром основы намотки; вторая серия включала в себя два образца спиралей на основе микропровода с диаметром металлической жилы 50 мкм, различающихся материалом и диаметром основы, а также периодичностью намотки. Данные образцы были изготовлены в лаборатории В.В. Молоканова в Институте Metallургии и Metalловедения им. А.А. Байкова в Москве.

В качестве исходных данных для оценки микромагнитной структуры на основе распределения магнитной проницаемости в сечении микропровода также были использованы данные о магнитостатических свойствах и импедансе микропроводов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{11}\text{Cr}_2$  с околонулевой константой магнитострикции различных диаметров.

На их основе были также сделаны предположения о микромагнитной структуре образцов в соответствии с общепринятыми методиками для сопоставления оценок с результатами диссертационного исследования. Данные об импедансе данных проводов на разных частотах, а также результаты магнитостатических измерений были предоставлены директором научно-образовательного центра «Умные материалы и биомедицинские приложения» Балтийского Федерального Университета имени Иммануила Канта Родионовой В.В. Микропровода были изготовлены в лаборатории В.И. Филиппова ООО НПП «Вичел», г. Пенза. Магнитостатические и магнитоимпедансные свойства микропроводов и методики их получения описаны в диссертации Родионовой В.В. [24], а также приводятся в тексте диссертации для полноты описания объекта исследований и сопоставления результатов, полученных с использованием различных экспериментальных методик, с указанием авторства и соответствующих библиографических ссылок.

В главе также приводится описание методик магнитостатических измерений методом вибрационной магнитометрии при комнатной температуре с использованием магнитометра Lakeshore 7407 и исследований магнитного импеданса микропроводов в частотном диапазоне 2-100 МГц при приложении продольного магнитного поля напряженностью до 100 Э с использованием векторного сетевого анализатора Agilent №9923А. Приводится описание методик получения данных о параллельной и перпендикулярной магнитному полю компонентах магнитного момента микропровода, получаемых с помощью вибрационного анизометра, а также импедансных измерений для серии микропроводов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{11}\text{Cr}_2$ .

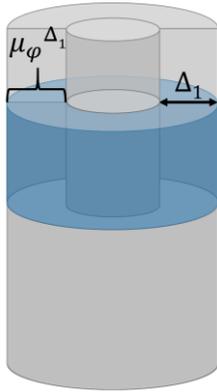
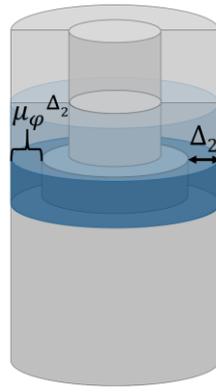
Большое внимание в данной главе уделяется методике расчета пространственного распределения магнитной проницаемости. В качестве основного приближения для интерпретации данных об импедансе аморфного ферромагнитного микропровода рассматривалось выражение для импеданса  $Z$  цилиндрического проводника в классическом случае постоянной магнитной проницаемости при слабом скин-эффекте [25]:

$$Z = -i \cdot 2\pi f \cdot L_e + R_{DC} \frac{ka J_0(ka)}{2 J_1(ka)}, \quad k = \frac{1-i}{\delta}, \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_\phi}} \quad (1)$$

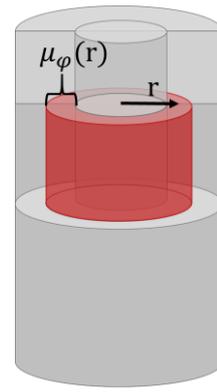
где  $R_{DC}$  – сопротивление постоянному току,  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя нулевого и первого порядка,  $\delta$  – толщина скин-слоя в случае плоской границы раздела сред,  $f$  –

частота тока,  $\sigma$  проводимость материала,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_\varphi$  циркулярная компонента магнитной проницаемости,  $a$  радиус провода,  $L_e$  – внешняя часть самоиндукции проводника,  $i$  – мнимая единица. Если же магнитная проницаемость не является постоянной величиной и имеет пространственное распределение, решение задачи поиска импеданса в аналитическом виде не выражается. В качестве первого шага в решении обратной задачи было использовано предположение, что данное выражение применимо при подстановке среднего по некоторому слою значения магнитной проницаемости. Предполагается, что данный слой вносит основной вклад в свойства провода и включает в себе существенную часть (70%) протекающего переменного тока. Магнитная проницаемость полагалась комплексной величиной. Тогда, положение минимума разности между экспериментальными значениями импеданса и теоретическими, рассчитанными по (1), на поверхности  $\{\mu'_\varphi, \mu''_\varphi\}$ , где  $\mu'_\varphi$  и  $\mu''_\varphi$  – действительная и мнимая части проницаемости, соответствует среднему значению проницаемости по слою провода толщиной  $h_{70\%}$ , в котором протекает 70% тока. В случае квазинепрерывной частотной зависимости импеданса в предположении, что все параметры, кроме частоты и магнитной проницаемости, фиксированы, действительная и мнимая части проницаемости цилиндрического проводника могут быть рассчитаны прямым вычислением из значений действительной и мнимой частей импеданса и их производных по частоте [26]. Таким образом, для каждой частоты измерений может быть определена соответствующая средняя магнитная проницаемость и толщина слоя, по которому проведено усреднение. Изменение частоты приводит к изменению глубины проникновения тока  $h_{70\%}$  и средней магнитной проницаемости. По известному набору значений глубин проникновения тока и соответствующих им средних значений магнитной проницаемости может быть восстановлено распределение магнитной проницаемости по радиусу микропровода. Схематичное изображение алгоритма оценки приведено на рисунке 1.

Расчеты в рамках данной модели могут быть проведены в том случае, когда условия эксперимента и предположения модели не противоречат друг другу. Использование выражения (1) правомерно при отсутствии неоднородных процессов намагничивания, приводящих к некорректности усреднения магнитной

а) частота  $f_1$ б) частота  $f_2 > f_1$ 

в) разностный слой



**Рисунок 1.** Схематичное изображение процедуры оценки распределения магнитной проницаемости: а) измерение на частоте  $f_1$  – соответствующее значение  $h_{70\%}$  (на рисунке обозначена символом  $\Delta_1$ ) и усредненной по слою циркулярной компоненты магнитной проницаемости  $\mu_{\varphi}^{\Delta_1}$ , б) измерение на частоте  $f_2 > f_1$  – соответствующее значение  $h_{70\%}$  (на рисунке обозначена символом  $\Delta_2$ ) и усредненной по слою циркулярной компоненты магнитной проницаемости  $\mu_{\varphi}^{\Delta_2}$ , в) разностный слой и соответствующее ему значение циркулярной компоненты магнитной проницаемости.

проницаемости. Данное условие может не соблюдаться для микропроводов с радиальным преимущественным направлением намагниченности, поскольку разбиение на домены приповерхностной области приводит к некогерентности вращения намагниченности при приложении поля в циркулярном направлении. Для микропроводов с циркулярно намагниченной оболочкой с небольшими градиентами анизотропии в объеме предположения модели преимущественно выполняются. Следует также отметить, что из-за фиксированного значения тока (70% от полного тока), протекающего через рассматриваемые слои, среднее по слою магнитное поле при измерениях на различных частотах существенно не меняется – величина магнитного поля пропорциональна интегральному току, протекающему через сечение. Таким образом, полевая зависимость магнитной проницаемости не дает заметного вклада в рассчитываемое радиальное распределение, вследствие чего не принималась во внимание. Зависимость от мгновенных значений переменного магнитного поля не рассматривалась вследствие усреднения определяемых величин по периоду пропускаемого тока. В мегагерцовом диапазоне основным механизмом перемагничивания является поворот вектора намагниченности. Следовательно, скачки радиальной зависимости магнитной проницаемости могут свидетельствовать о локальных неоднородностях микромагнитной структуры, вызванных дефектами или положением доменных границ.

Расчеты были проведены в пакете Matlab с использованием встроенных функций. Методика расчета распределения магнитной проницаемости опубликована в работах [A1, A2].

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований магнитостатических и магнитоимпедансных свойств аморфных микропроводов состава  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  и пружин на основе микропроводов идентичного состава. Показано, что микропровода данной серии не характеризуются наличием аксиально намагниченного керна. Одинокные пики импеданса на частоте 2 МГц для покрытого стеклом и отожженного при 200°C микропроводов свидетельствуют о том, что центральные части этих проводов имеют преимущественно радиальное направление намагниченности или же направление под углом к оси провода, имеющее как аксиальную, так и радиальную компоненты. В процесс токового перемагничивания микропровода со снятой стеклянной оболочкой и провода, отожженного при 300°C, вовлечена преимущественно циркулярно намагниченная оболочка. Изменения микромагнитной структуры при обработке объясняются эволюцией анизотропии при температурных и механических воздействиях. Результаты представлены в работе [A2].

Спирали на основе аморфных микропроводов продемонстрировали управляемую анизотропию свойств. Для спиралей из провода с диаметром жилы 100 мкм полевые зависимости намагниченности, измеренные при приложении поля параллельно и перпендикулярно оси провода, имеют очень близкий вид. Для пружин с диаметром микропровода 50 мкм направление перпендикулярно оси спирали является выделенным. Магнитный отклик преимущественно определяется геликоидальностью магнитной структуры образующего спираль провода и углом намотки. Показано также, что для образцов с диаметром провода 100 мкм наблюдаются асимметричные полевые зависимости импеданса. Такой вид зависимости характерен для микропроводов с геликоидальным типом анизотропии при приложении поля смещения [21]. В системах микропроводов поле смещения может быть реализовано за счет взаимодействия элементов [27]. В данном случае магнитостатические взаимодействия витков спирали могут выступать в качестве подмагничивающего поля, определяющего преимущественное направление намагниченности в проводе с геликоидальной анизотропией. Данные результаты были представлены на конференции IVSM-2021

(Светлогорск, Россия) [Т1].

В четвертой главе описаны результаты определения распределения магнитной проницаемости в сечении аморфных микропроводов двух составов. Первый раздел главы описывает результаты расчетов с использованием предлагаемой модели для микропроводов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{11}\text{Cr}_2$ .

Для самого тонкого образца серии с диаметром металлической жилы 6.4 мкм корректное распределение проницаемости по описанной методике не может быть определено: в случае больших внутренних напряжений, какие присутствуют в образцах малых диаметров, радиальная зависимость магнитной проницаемости может быть резко спадающей, и усреднение приводит к возникновению больших погрешностей. Возможен также вклад неоднородных процессов перемагничивания, не учитываемых в рамках модели.

Для микропроводов диаметрами 8.5 и 10 мкм рассчитанные проницаемости имеют сравнительно низкие значения (порядка  $10^3$ ), а радиальная зависимость не выражена. По данным магнитоимпедансных и магнитостатических измерений данные образцы характеризуются радиальным направлением намагниченности в оболочке. Поскольку в описанной модели не учитываются неоднородные процессы намагничивания, свойственные образцам с радиальным преимущественным направлением намагниченности, реальные значения магнитной проницаемости могут значительно отличаться от расчетных. Это означает, что такая упрощенная модель не может быть полноценно использована для микропроводов с радиально намагниченной оболочкой и позволяет только предположить существование таких процессов в области измерений на основании сравнения данных одной серии и различных областей одного провода.

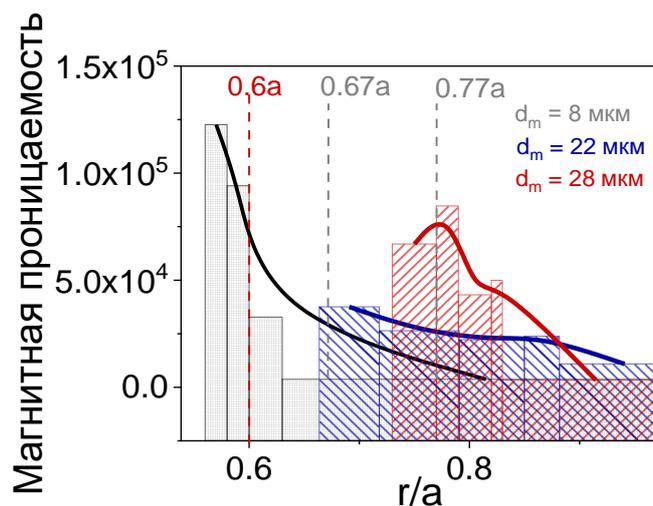
Распределение проницаемости, рассчитанное для образца диаметром 8 мкм, является спадающим при приближении к поверхности провода (рисунок 2, черная гистограмма). Резкое уменьшение циркулярной проницаемости происходит на расстоянии около  $0.60a$  от оси микропровода ( $a$  – радиус микропровода). Согласно оценке из коэффициента прямоугольности петли гистерезиса для данного образца, радиус аксиально намагниченного ядра составлял  $0.67a$ . Следовательно, резкое изменение циркулярной проницаемости может быть связано с изменением

направления преимущественной ориентации намагниченности с аксиального на циркулярное на границе между керном и оболочкой.

Для микропровода диаметром 22 мкм (рисунок 2, синяя гистограмма) циркулярная магнитная проницаемости медленно убывает вдоль радиальной координаты без резких скачков. Отсутствие скачков

проницаемости свидетельствует об однородной микромагнитной структуре исследуемой области. Все слои, по которым проведено усреднение, наиболее вероятно, были расположены в области оболочки. Данный результат также согласуется с оценкой диаметра керна из коэффициента прямоугольности петли гистерезиса. Аналогичные результаты были получены и для образца с диаметром металлической жилы 28 мкм: распределение проницаемости имеет максимум при расстоянии  $0.76a$  от центра, а затем резко уменьшается (рисунок 2, красная гистограмма). Данный результат может быть объяснен образованием локальных возмущений намагниченности и быстро меняющейся проницаемостью в оболочке, связанной с усилением магнитоупругой анизотропии при приближении к поверхности провода. Описанные результаты представлены в публикации [A1].

Второй раздел главы описывает результаты расчетов с использованием предлагаемой модели для микропроводов  $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ . Для микропроводов в стеклянной оболочке и отожженного при температуре  $200^{\circ}C$  полученные распределения магнитной проницаемости вблизи поверхности микропровода имели немонотонный вид. Обе кривые демонстрируют осциллирующее поведение в исследованных слоях, расположенных ближе к центру провода. Величина проницаемости имела порядок  $10^4$ . Ранее отмечалось, что модель, используемая для восстановления распределения магнитной проницаемости, не учитывает



**Рисунок 2.** Радиальное распределение магнитной проницаемости в сечении микропроводов состава  $Co_{70}Fe_4B_{13}Si_{11}Cr_2$  с диаметрами металлической жилы  $a$  равными 8 мкм, 22 мкм и 28 мкм.

неоднородные процессы намагничивания, происходящие в областях, например, с радиальной анизотропией. Возникающие при неоднородном перемагничивании вихревые токи искажают магнитные поля внутри провода и, следовательно, вносят вклад в величину рассчитываемой магнитной проницаемости. Амплитуда осцилляций спадает при движении вдоль радиальной координаты, что может свидетельствовать о переходе в область циркулярно намагниченной оболочки.

При снятии стеклянной оболочки частичная релаксация напряжений приводит к уменьшению неоднородности проницаемости и более гладкому поведению линии тренда. Для данного микропровода измерения импеданса в диапазоне 2-10 МГц затрагивали преимущественно область циркулярной намагниченности. Распределение проницаемости в этом случае имеет вид плавно спадающей при движении вдоль радиальной координаты кривой. Данный спад объясняется увеличением значений константы анизотропии за счет увеличения упругих напряжений при приближении к поверхности провода. Микропровод, отожженный при 300°C и характеризующийся более сильной циркулярной анизотропией в рассматриваемой области, закономерно демонстрирует на порядок меньшие значения магнитной проницаемости, а радиальная зависимость также имеет вид кривой, спадающей при приближении к поверхности провода. Описанные результаты представлены в публикации [A2].

В **пятой главе** диссертационной работы описываются подходы и результаты микромагнитного моделирования процессов перемагничивания аморфных микропроводов. В первом разделе описана методика микромагнитного моделирования с использованием пакета OOMMF (Object Oriented MicroMagnetic Framework) [28], приводятся основные параметры модели, представлен подход к моделированию токового перемагничивания аморфного провода, а также способ оценки пространственного распределения локальных значений эффективной магнитной проницаемости (описывающих изменения локальных значений намагниченности относительно *внешнего* магнитного поля). Микромагнитное моделирование проведено при использовании параметров, соответствующих типичным характеристикам сплавов с положительной и отрицательной магнитострикцией. Для каждого случая было получено равновесное распределение намагниченности в объеме микропровода, а затем была визуализирована эволюция намагниченности при приложении

циркулярного магнитного поля переменной амплитуды, соответствующего магнитному полю переменного электрического тока с учетом скин-эффекта, а также получены радиальные зависимости локальных значений эффективной магнитной проницаемости.

Во втором разделе приводятся результаты микромагнитного моделирования для микропроводов с положительной и отрицательной константами магнитострикции. Показано, что доменная граница между керном и приповерхностной оболочкой микропровода, связанная с изменением преимущественного направления намагниченности и локальным минимумом константы магнитоупругой анизотропии, демонстрирует большие значения локальной магнитной проницаемости. Наличие пика распределения циркулярной компоненты проницаемости, в частности, может свидетельствовать о нахождении в этой области доменной границы. Подобные зависимости наблюдались в экспериментальных результатах, описанных в главе 4.

Также было показано, что присутствие неоднородных процессов намагничивания, приводящих к возникновению вихревых токов, может проявляться в виде отрицательной эффективной магнитной проницаемости, а также вызывать осцилляции рассчитанных значений ее радиальной зависимости в силу вихревого характера эффективного поля. Так как в модели численной обработки экспериментальных данных не учитываются неоднородные процессы перемагничивания, данные об осцилляции проницаемости и ее отрицательных значениях свидетельствуют о том, что именно такие процессы могут вносить существенные вклады в импеданс провода, и демонстрируют границы применимости модели.

Предварительные данные о микромагнитной структуре и закономерностях перемагничивания для микропроводов различных типов были опубликованы в работе [A3]. Результаты симуляций перемагничивания микропроводов электрическим током и сравнение их с экспериментальными данными были представлены на конференциях 5<sup>th</sup> Young Researchers in Magnetism (Жирона, Испания) [T2] и ИВСМ-2021 (Светлогорск, Россия) [T3].

В конце диссертационной работы приводятся **основные результаты, заключение**, а также **список используемой литературы**. В качестве

сопроводительных материалов приводятся **3 приложения**, содержащие примеры кодов используемых для расчетов и микромагнитного моделирования программ.

### Основные результаты

1. Исследованы магнитостатические и магнитоимпедансные свойства микропроводов и спиралей на их основе. Показано, что спирали на основе микропроводов могут обладать управляемыми анизотропными свойствами – отклик может быть изотропным для определенных параметров микропровода и намотки спирали. Спирали из аморфных микропроводов могут демонстрировать асимметричный гигантский магнитоимпедансный эффект, свойственный материалам с геликоидальной анизотропией при приложении поля или тока смещения.
2. Разработана методика определения распределения магнитной проницаемости в сечении микропровода из экспериментальных данных о частотной зависимости импеданса. Сформулированы критерии применимости методики, удовлетворяемые условиями проведения эксперимента, заключающиеся в отсутствии неоднородных процессов перемагничивания, а также малости вкладов полевой и частотной зависимости магнитной проницаемости
3. Рассчитаны распределения магнитной проницаемости в серии микропроводов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_4\text{V}_{13}\text{Si}_{11}\text{Cr}_2$  с околонулевой магнитострикцией с различными диаметрами ферромагнитной жилы. Для микропроводов с преобладающим циркулярным типом магнитной анизотропии максимум распределения магнитной проницаемости находится в области предполагаемого положения доменной границы между аксиально намагниченным керном и циркулярно намагниченной оболочкой.
4. Построены распределения магнитной проницаемости в серии микропроводов  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{V}_{11}$  с диаметром ферромагнитной жилы 90 мкм. Показано, что релаксация механических напряжений при обработке приводит к изменению вида радиальной зависимости магнитной проницаемости, в том числе за счет изменения процессов перемагничивания.
5. Построена микромагнитная модель равновесного распределения намагниченности в аморфных микропроводах с положительной и отрицательной магнитострикцией, а также динамики токового перемагничивания. Получены локальные значения эффективной магнитной проницаемости. Показано, что

радиальное распределение проницаемости имеет максимум в области нахождения границы между керном и оболочкой. Обнаружено, что неоднородные процессы намагничивания могут приводить к возникновению вихревого поведения эффективного магнитного поля, что проявляется в виде осцилляций радиального распределения эффективной проницаемости и ее отрицательных значений. Результаты моделирования подтверждают экспериментальные данные.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:**

A1. Alekhina I., Kolesnikova V., Rodionov V., Andreev N., Panina L., Rodionova V., Perov N. An indirect method of micromagnetic structure estimation in microwires // *Nanomaterials*. — 2021. — Vol. 11, no. 2. — P. 274–274 (SJR Q1 IF: 0,919, DOI: 10.3390/nano11020274);

A2. Alekhina I., Kolesnikova V., Komlev A., Khajriullin M., Makarova L., Rodionova V., Perov N. Radial dependence of circular magnetic permeability of amorphous magnetic microwires // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2021. — Vol. 537. — P. 168155. (SJR Q2 IF: 0,67, DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168155);

A3. Алехина Ю. А., Перов Н. С. Моделирование процессов перемагничивания аморфных магнитных микропроводов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2022. — Т. 86, № 2. — С. 170–174. (DOI: 10.31857/S036767652202003X)

Alekhina Y. A., Perov N. S. Modelling of the magnetization reversal in amorphous magnetic microwires // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2022. — Vol. 86. — P. 120–123. (SJR Q3 IF: 0,226, DOI: 10.3103/S1062873822020034).

**Иные публикации:**

**Тезисы докладов, упоминаемые в тексте диссертации:**

T1. Perov N., Shalygin A., Alekhina I., Molokanov V. Magnetic properties of the amorphous magnetic microsprints // *Book of abstract IBCM-21*. - Svetlogorsk, Russia, 2021. - P. 69.

T2. Alekhina Iu., Kolesnikova V., Andreev N., Rodionov V., Rodionova V., Panina L., Perov N. Permeability Volume Distribution in Amorphous Magnetic Microwires: Experiment and Simulation // 5th Young Researchers in Magnetism. Book of abstracts. — Girona, 2021. — P. P08.

T3. Alekhina Iu., Perov N. Magnetization reversal in amorphous magnetic microwires // Book of abstract IBCM21. — Svetlogorsk, Russia, 2021. — P. 101.

**Тезисы докладов, опубликованные в рамках апробации результатов диссертации:**

T4. Perov N., Alekhina Iu., Shendrikova L., Kolesnikova V., Rodionova V., Panina L. Permeability of amorphous magnetic ribbon // Book of abstract of Soft Magnetic materials Conference. — Grenoble, France, 2022. — P. 127.

T5. Алехина Ю.А., Перов Н.С. Моделирование процессов перемагничивания аморфных магнитных микропроводов // Тезисы докладов XXI Всероссийской школы–семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21). — Екатеринбург, 2021. — С. 50.

T6. Алехина Ю.А., Колесникова В.Г., Родионов В.В., Андреев Н.В., Панина Л.В., Родионова В.В., Перов Н.С. Радиальное распределение магнитной проницаемости в аморфных магнитных микропроводах // Сборник тезисов конференции «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах». — МИРЭА, Москва, 2021 — С. 3–1–3–4.

T7. Perov N., Alekhina Iu., Varaban I., Khajrullin M., Kolesnikova V., Komlev A., Makarova L., Rodionova V. Radial dependence of circular magnetic permeability of amorphous magnetic microwires // Book of abstracts of The Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2020). — Virtual, 2020. — P. 372.

T8. Алехина Ю.А., Перов Н.С. Динамика процесса перемагничивания аморфного магнитного микропровода // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Фундаментальная и прикладная физика. — МФТИ, Долгопрудный, 2020. — С. 369–371.

T9. Perov N., Makarova L., Alekhina Yu, Khairullin M., Komlev A., Glezer A. Amorphous soft magnetic metallic alloys. Advantages and perspectives // EASTMAG-2019 Book of Abstracts. — Ekaterinburg, Russia, 2019. — P. 169.

T10. Perov N., Alekhina Iu., Makarova L., Khajrullin M., Baraban I., Rodionova V., Kolesnikova V., Komlev A., Makarova L. Complex magnetic permeability determination for magnetic microwires // Abstracts of Joint European Symposium on magnetism. — Uppsala, Sweden, 2019. — P. P250.

T11. Komlev A., Alekhina Yu., Makarova L., Kolesnikova V., Rodionova V., Baraban I., Khairullin M., Perov N. Magnetic permeability of magnetic microwires // Book of Abstracts of 8th International Workshop on Magnetic Wires. — Svetlogorsk, Russia, 2019. — P. 23.

T12. Perov N.S., Alekhina Yu.A., Makarova L.A., Rodionova V.V., Kolesnikova V.G., Khairullin M.F., Baraban I.A., Urusova B.I. Simulation of remagnetization by current in soft magnetic wires // CCMR Abstract Book. — KINTEX Goyang South Korea, 2019. — P. 176–178.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Губанов А.И. Квазиклассическая теория аморфных ферромагнетиков // Физика твердого тела. - 1960. - Vol. 2, № 3. - P. 502–513.
2. Сузуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / ed. Масумото Т. - Москва: Металлургия, 1987. - 328 p.
3. Zhukov A., Corte-Leon P., Gonzalez-Legarreta L., Ipatov M., Blanco J.M., Gonzalez A., Zhukova V. Advanced functional magnetic microwires for technological applications // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2022. - Vol. 55, № 25. - P. 253003. - DOI:10.1088/1361-6463/AC4FD7.
4. Zhukova V., Corte-Leon P., Blanco J.M., Ipatov M., Gonzalez-Legarreta L., Gonzalez A., Zhukov A. Development of Magnetically Soft Amorphous Microwires for Technological Applications // Chemosensors. - 2022. - Vol. 10, № 1. - P. 26. - DOI:10.3390/chemosensors10010026.
5. Vázquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // Journal of Physics D: Applied Physics. - 1996. - Vol. 29, № 4. - P. 939. - DOI:10.1088/0022-3727/29/4/001.
6. Sixtus K.J., Tonks L. Propagation of large Barkhausen discontinuities. II // Phys. Rev. - 1932. - Vol. 42, № 3. - P. 419. - DOI:10.1103/physrev.42.419.

7. Panina L.V., Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Applied Physics Letters Phys. Lett.* - 1994. - Vol. 65. - P. 1189. - DOI:10.1063/1.112104.
8. Kurlyandskaya G.V. Giant magnetoimpedance for biosensing: Advantages and shortcomings // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 2009. - Vol. 321, № 7. - P. 659–662. - DOI:10.1016/J.JMMM.2008.11.019.
9. Mohri K., Uchiyama T., Shen L.P., Cai C.M., Panina L. v. Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 2002. - Vol. 249, № 1–2. - P. 351–356. - DOI:10.1016/S0304-8853(02)00558-9.
10. Corte-Leon P., Zhukova V., Chizhik A., Blanco J.M., Ipatov M., Gonzalez-Legarreta L., Zhukov A. Magnetic Microwires with Unique Combination of Magnetic Properties Suitable for Various Magnetic Sensor Applications // *Sensors.* - 2020. - Vol. 20, № 24. - P. 7203. - DOI:10.3390/S20247203.
11. Singh S.P. Magnetoencephalography: Basic principles // *Annals of Indian Academy of Neurology.* - 2014. - Vol. 17, № 5. - P. 107. - DOI:10.4103/0972-2327.128676.
12. Zhukova V., Corte-Leon P., Blanco J.M., Ipatov M., Gonzalez J., Zhukov A. Electronic Surveillance and Security Applications of Magnetic Microwires // *Chemosensors.* - 2021. - Vol. 9, № 5. - P. 100. - DOI:10.3390/chemosensors9050100.
13. Vázquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // *Journal of Physics D: Applied Physics.* - 1996. - Vol. 29, № 4. - P. 939–949. - DOI:10.1088/0022-3727/29/4/001.
14. Vazquez M. Advanced magnetic materials // *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials* / ed. Kronmüller H., Parkin S. - John Wiley & Sons, Ltd, 2007. - P. 1–29. - DOI:10.1002/9780470022184.hmm418.
15. Peng H.-X., Qin F., Phan M.-H. Ferromagnetic Microwire Composites / ed. Derby B. - Springer, 2016. - 99–117 p. - DOI:10.1007/978-3-319-29276-2.
16. Usov N.A., Antonov A.S., Lagar'kov A.N. Theory of giant magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 1998. - Vol. 185, № 2. - P. 159–173. - DOI:10.1016/S0304-8853(97)01148-7.
17. Chizhik A., Gonzalez J., Zhukov A., Corte-Leon P., Zhukova V., Gawroński P.,

- Stupakiewicz A. Influence of combined mechanical stress on magnetic structure in magnetic microwires // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 2020. - Vol. 513. - P. 166974. - DOI:10.1016/J.JMMM.2020.166974.
18. Zhukova V., Cobeño A.F., Zhukov A., Blanco J.M., Puerta S., Gonzalez J., Vázquez M. Tailoring of magnetic properties of glass-coated microwires by current annealing // *Journal of Non-Crystalline Solids*. - 2001. - Vol. 287, № 1–3. - P. 31–36. - DOI:10.1016/S0022-3093(01)00536-1.
  19. Zhukova V., Corte-Leon P., González-Legarreta L., Talaat A., Blanco J.M., Ipatov M., Olivera J., Zhukov A. Optimization of Magnetic Properties of Magnetic Microwires by Post-Processing // *Processes*. - 2020. - Vol. 8, № 8. - P. 1006. - DOI:10.3390/PR8081006.
  20. Chizhik A., Gonzalez J., Gawroński P., Stupakiewicz A. Helical magnetic structures in amorphous microwires: Magneto-optical study and micromagnetic simulations // *Magnetic Nano- and Microwires*. 2nd ed. / ed. Vázquez M. - Woodhead Publishing, 2020. - P. 519–534. - DOI:10.1016/B978-0-08-102832-2.00018-9.
  21. Panina L.V., Mohri K., Makhnovskiy D.P. Mechanism of asymmetrical magnetoimpedance in amorphous wires // *Journal of Applied Physics*. - 1999. - Vol. 85, № 8. - P. 5444. - DOI:10.1063/1.369970.
  22. Rodionova V., Ipatov M., Ilyn M., Zhukova V., Perov N., Gonzalez J., Zhukov A. Tailoring of Magnetic Properties of Magnetostatically-Coupled Glass-Covered Magnetic Microwires // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2010 24:1. - 2010. - Vol. 24, № 1. - P. 541–547. - DOI:10.1007/S10948-010-0989-0.
  23. Donnelly C., Gliga S., Scagnoli V., Holler M., Raabe J., Heyderman L.J., Guizar-Sicairos M. Tomographic reconstruction of a three-dimensional magnetization vector field // *New Journal of Physics*. - 2018. - Vol. 20, № 8. - P. 083009. - DOI:10.1088/1367-2630/AAD35A.
  24. Родионова В.В. Статические и динамические магнитные свойства аморфных микропроводов и их систем // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. - Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, 2010. - 165 p.
  25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Т. VIII. 2nd ed. -

Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. - 621 p.

26. Sossmeier K.D., Callegari G.L., Dorneles L.S., Carara M. Wide-range frequency method to obtain the transverse permeability from impedance measurements // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 2008. - Vol. 320, № 14. - P. e1–e3. - DOI:10.1016/J.JMMM.2008.02.004.
27. Rodionova V., Ipatov M., Ilyn M., Zhukova V., Perov N., Gonzalez J., Zhukov A. Tailoring of Magnetic Properties of Magnetostatically-Coupled Glass-Covered Magnetic Microwires // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. - 2010. - Vol. 24, № 1. - P. 541–547. - DOI:10.1007/S10948-010-0989-0.
28. Donahue M.J., Porter D.G. OOMMF User's Guide, Version 1.0. - 1999. - DOI:10.6028/NIST.IR.6376.